

山形大学紀要 (工学) 第11巻 第1号 昭和45年1月
Bull. of Yamagata univ. Eng., Vol.11 No.1 Jan. 1970

冷間転造歯車のX線残留応力およびかたさについて

井上 和夫・植松 整三

工学部 精密工学科

1 緒 言

歯車の転造加工法は、従来の切削による歯車加工法に比べて数多くの特性をもっている。歯車転造の目的は、材料の塑性を利用して切り屑を出さずに、寸法の均一な精度の高い歯車を短時間に加工することである。今までの歯車転造の研究の多くは、上記の目的達成のために費され加工上の問題について数多くの点が明らかにされて来た。⁽¹⁾

一方、転造歯車は加工硬化により歯面近くのかたさが増加するが、これは歯車の強度向上に欠くことのできない性質である。また、一般には、歯車の歯元の圧縮残留応力は、歯の曲げ強度の向上に寄与するが、転造歯車でも同様のことが期待される。しかるに、転造歯車が動力伝達用歯車として、どの程度の強度特性をそなえているかを検討していくうえに、上記の歯面の強度と歯の曲げ強度の2点について考察されなければならない。時には、転造後の熱処理によって、歯面をさらに硬化して使用することもあるが、その際の残留応力の状態を知るとは、寸法精度、歯形誤差などに大いに関係があるので重要と思われる。

これらの問題については、ほとんど研究されておらず、筆者らはこれらの問題を逐次明らかにしていくことによって、転造歯車の実用化に寄与することを目的としている。本報は、この研究の第一段階として、転造しろを段階的に変化させて⁽²⁾、それらの各段階において発生する残留応力と加工硬化層のかたさの分布および転造加工による変形組織の実態を明らかにすることを目的としている。

2 実験方法

2・1 試料および転造方法

使用した材料は鋼材 S20C である。それを市販材のままおよび 900°C—1 時間焼なましを施した状態で使用した。これらの材料から作成した歯車素材は従来の円筒形素材とそれに予備切削を加えた素材である。素材の予備切削は素材外周を基準にして、工具切込み深さをモジュール m の 0.5 倍、1 倍、1.5 倍、2 倍とし、それらを $0.5 \times m$ 切削、 $1 \times m$ 切削、 $1.5 \times m$ 切削、 $2 \times m$ 切削および予備切削を施さない円筒形素材を $0 \times m$ 切削と名づけた。転造された歯車諸元は Table 1 に示す。

転造は先に筆者らが試作した強制駆動方式による油圧式転造盤⁽³⁾により行なった。転造条件は素材の厚さに対し最高押込み力 220 kg/mm 、最高押込み力に到達するまでの所要時間 20 秒、最高押込み力保持時間 20 秒であり、正転に引続いて同じ条件により逆転しながら

Table 1 Dimensions of rolled gear

Number of teeth	30
Module	2.5
Pressure angle	20°
Helix angle	20°
Material used	S20C
Blank diameter before rolling	83.00
Finished diameter after rolling	85.40

再度転造した。なお、残留応力測定用および組織観察用の試料は、側面近くの複雑な塑性流れをさけるため、歯幅の中央断面まで研削し、さらにエメリーペーパーにより仕上げてから *Nital* 液で腐食した。

2・2 X線による残留応力と半価幅の測定*

歯の曲げ強度については、作図や計算の容易な *Hofer* の危険断面⁽⁴⁾上の歯元すみ肉部附近およびその中央部について X 線による残留応力と半価幅の測定を行なった。測定した残留応力の方向は、歯元すみ肉部附近においては歯元すみ肉曲線の接線が歯の中心線と 30° をなす方向、また *Hofer* の危険断面上の中央部においては歯丈方向である。使用した応力測定装置は理学電機製自動記録式 X 線ひずみ測定装置であり、測定条件は、特性 X 線 *CrKa* 線、管電圧 30KV、管電流 5 mA、X 線照射面積は 1 mm ϕ である。回折強度曲線は *Fixed Count* 法 (4000 カウント計数に要する時間測定) で描き、放物線 3 点近似法でピーク位置を決定し、0°—45° 法で応力を計算した。X 線照射位置は *Fig. 1* に示す。

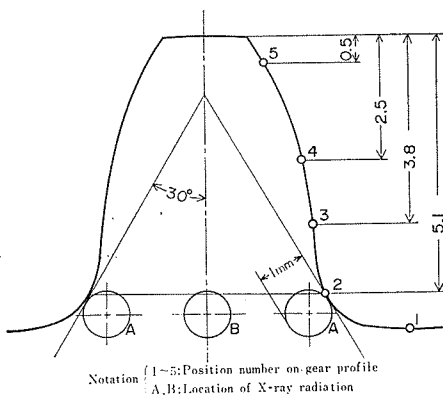


Fig. 1 Hofer's weakest section of gear tooth

X 線照射面積の調整は厚さ 1 mm のステンレス板に直径 1.0 mm ϕ の穴をあけてマスクを作り、これを入射側ソーラースリットにとりつけた。測定位置は万能投影機の微動載物台と *Fig. 2* に示すガイドロッドを用いて定めた。

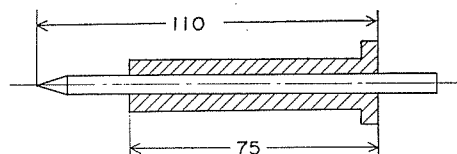


Fig. 2 Guide Rod

* 本報において、残留応力と半価幅の測定は、予備切削なしの転造歯車についてのみしかと行っていない。

2・3 かたさ測定と組織観察

転造しを段階的に変化させた試料について、加工硬化層の硬度分布を Fig. 1 に示す番号 1～5 の位置において、歯面の法線方向に表面から約 2 mm の深さまで、微小硬度計により調べた。

転造による結晶の変形状態の観察は、歯底、歯元すみ肉部、ピッチ点について、顕微鏡観察と X 線観察により行なった。X 線回折写真の撮影は背面反射カメラを用い、スリット径 $0.5\text{mm}\phi$ 、フィルム試料間距離 50mm とした。その他は上述の計数管法の場合と同じ操作である。

3 実験結果

3・1 X線による残留応力と半価幅

Fig. 3 に市販材を用いた転造歯車の歯元すみ肉部より得られた半価幅の広い回折強度曲線の例を示す。Fig. 4 には X 線により測定した転造歯車の残留応力を示し、Fig. 5 には X 線回折線半価幅比を示した。半価幅比 b/B の初期値 B は S20C 材の焼なましを

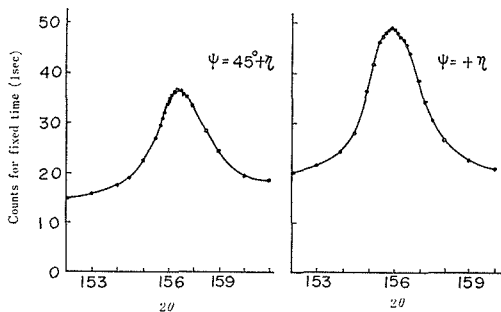


Fig. 3 An example of diffraction intensity curve obtained by fixed count method

Location of X-ray radiation : at A
Sample : as received

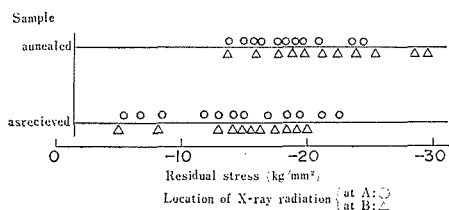


Fig. 4 Residual stress of Hofer's weakest section

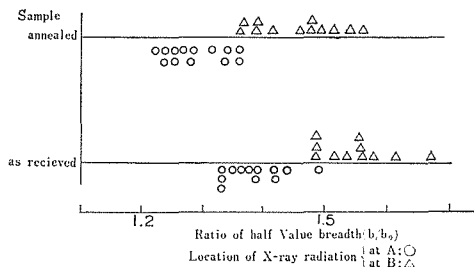


Fig. 5 Ratio of half value breadth of Hofer's weakest section

施した状態の測定値である。転造過程において作用する応力状態は複雑で解析困難であるから、加えた外力と残留応力および半価幅の関係を正確に求めることを目的とせず、歯形の位置による相対的な比較を行なった。

Hofer の危険断面上では残留応力の変化はほとんど認められない。使用した材料別に比較すれば、焼なまし材を用いた転造歯車は平均値が約 -20kg/mm^2 であり、市販材により転造した場合、約 -15kg/mm^2 である。

半価幅比と歯形上の位置の関係を比較すれば、歯の中心部より歯元附近の値が大きいが、これが歯元附近の加工硬化がより激しいことを示している。

市販材と焼なまし材を使用した結果を比較すれば、市販材には材料の有する初期ひずみの影響が加わり、歯形の各部分において、半価幅比は大きい方にずれて分布している。

3・2 かたさ測定と組織観察

予備切削なし（ $0 \times m$ 切削）の転造歯車の歯面附近の硬度分布を *Fig. 6*（焼なまし材）、*Fig. 7*（市販材）について示す。両結果を比較した結果、市販材を用いた転造歯車は、

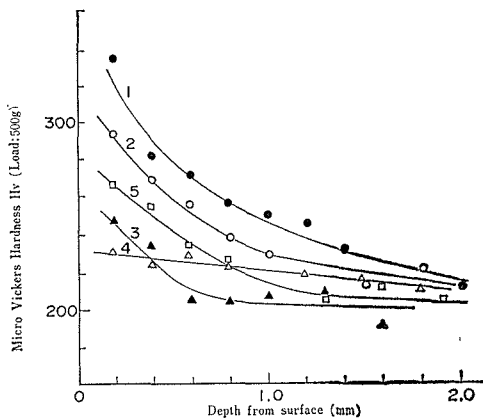


Fig. 6 Distribution of Micro Vickers Hardness on the mid section of rolled gear (annealed blank)

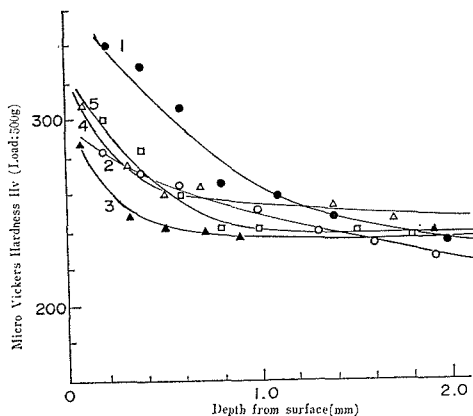


Fig. 7 Distribution of Micro Vickers Hardness on the mid section of rolled gear (as received blank)

焼なまし材を用いた転造歯車より歯形各部がかたくなっている。転造作用による加工硬化の影響は歯の中心部にまでおよび、そこでは歯車素材より約 $60H_v$ かたい。また、硬度上昇の著しい歯面附近のかたさは、歯面の位置により変化しているから、この現象と転造作用の関係を明らかにするために、焼なまし材を用いて実験を行なった。

歯面附近のかたさと歯面の位置の関係およびそれらと転造しろの影響について Fig. 8 に示す。転造しろの少ない $2 \times m$ 切削の場合、歯元附近の表面層 $0.1mm$ のみが硬化するだけで、他の部分はほとんど硬化していない。転造しろが増加し、 $1 \times m$ 切削の場合、ピッチ点附近から歯元にかけて硬度は上昇していくが、歯底の硬度は歯元すみ肉部より低く

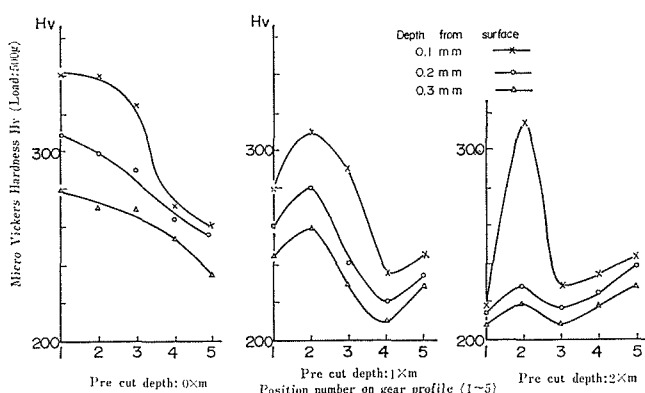


Fig. 8 Variation of hardness on gear profile

なっている。転造のみの場合、歯先から歯元に向うにつれて歯面硬度は上昇していく。これらの結果は、歯面の硬化層のかたさは歯面に沿って変化し、歯元附近で最もかたくなり、ピッチ点附近で一番低くなることを示している。

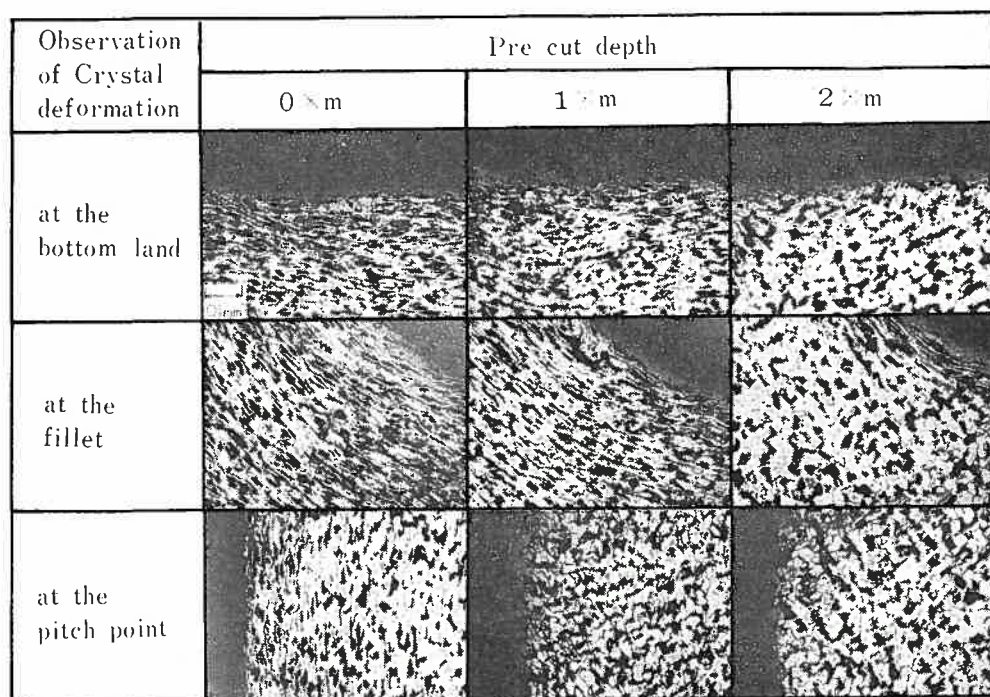
上述の結果 (Fig. 8) を結晶の変形状態と対応させて Fig. 9 に示す。転造のみによる歯車は歯底、歯元すみ肉部附近の繊維組織の層は厚く、結晶粒も微細化しているが、ピッチ点附近の変形組織は歯元附近に比べ、繊維組織の層もうすく、結晶粒の微細化も起っていない。予備切削量が増加するにつれて、歯面上の位置によって変形組織の変化する傾向は先に示した硬度分布と全く同様である。

4 考 察

4・1 転造歯車の表面硬化層について

転造歯車の表面硬化層のかたさは、表面より深さ方向に変化するとともに、歯形曲線に沿う変化をする。

かたさの歯形曲線に沿う変化は、転造工具と転造素材の接点におけるすべり方向に関係していると考えられる。転造は転造期間中に中心距離が変化しながら歯形を創成し、材料の塑性流動により歯形が形成されていく。塑性流動の方向は、かみあいピッチ点を境にして反転し、かつ、塑性流動することによって材料は硬化する。従って、塑性流動の蓄積される歯元すみ肉部が最もかたさが上昇し、また、歯先の方向もかたさは増加する。この

Fig. 9 Microstructure of cold rolled gear ($\times 100$)

考えによれば、Fig. 8 の現象は容易に説明される。即ち、予備切削 $2 \times m$ の転造歯車は歯面硬度の最もかたくなる位置が歯元すみ肉部であり、ピッチ点附近の硬度は一番低くなり、ピッチ点を境にして歯先方向へかけてかたさは上昇する。転造しろが増加するに従って、かみあいピッチ点が歯先よりの位置からスタートするから、歯面に沿った硬度の一番低い位置は歯先よりの位置に移動し、歯元すみ肉部の硬度は増加する。

転造期間中に噛み合っている歯の組数の変動は、歯面に加わる荷重に直ちに影響してくる。歯面に加わる荷重が大きい場合、加工硬化が促進されるものとすれば、ピッチ点附近のかたさは、一般に歯形上の部分よりかたくなるはずである。しかし、実験結果によれば、ピッチ点附近のかたさは歯形上の他の部分に比べて低い。これは、転造歯車の表面硬化層は、歯面に加わる荷重の大小に影響されるより、転造作用による材料の塑性流動の方向により大きく影響されているものと考えられる。

4・2 X線回折結果について

軟鋼において、機械的変形量 ϵ_M と X 線回折線半価幅比 b/B の対応関係は $b/B = f(\epsilon_M)$ とみなされる。従って、X 線回折線半価幅比は転造歯車の各部において機械的変形量の異なることを示している。

一方、弾性学的に複雑な形状をした歯車の残留応力は、歯車全体としてバランスが保たれているのであるから、転造により発生した歯車各部の残留応力を明確にすることは現段階では困難である。従って、本報に示された Hofer の危険断面上の残留応力値が、歯元

と歯の中央部でほぼ同じ値であることに明快な解釈を与えることは困難である。

残留応力を使用した材料別に比較した場合、焼なまし材を用いた転造歯車の歯元すみ肉部は、圧縮残留応力 -20kg/mm^2 を有し、市販材を用いた場合の -15kg/mm^2 より、 5kg/mm^2 も大きい。これは焼なまし材はのびやすいために、表面附近の応力勾配を大きくしていることによるものと考えられる。

5 結 言

転造歯車の加工硬化層の観察、Hofer の危険断面上の残留応力、半価幅の測定を行なった結果、次のことが明らかにされた。

(1) 歯元すみ肉部に、歯の曲げ強さの向上に寄与する圧縮残留応力があり、その値は、焼なまし材を用いた歯車で約 -20kg/mm^2 、市販材を用いた歯車で約 -15kg/mm^2 である。

(2) 歯の中心部の結晶は転造作用による盛り上り変形の影響を受け、歯車素材より約60 H_v かたく、歯丈方向に圧縮残留応力が存在する。

(3) 表面加工硬化層のかたさは、歯形曲線に沿って変化するとともに、表面から内部に向っても変化する。歯元すみ肉部のかたさは、歯形上の他の位置に比べ最高値を示し、ピッチ点附近は最小値を示す。

(4) 歯車の表面の組織は、歯形に沿った繊維組織になっており、歯元すみ肉部附近が最も厚く、ピッチ点附近ではうすくなる。

本報に示されたように、転造歯車の残留応力の発生と分布状況は複雑であるから、定量的に検討することは出来なかった。今後はこれらについてもさらに追究するとともに、転造歯車の動力伝達用歯車の特性についても検討を続けるつもりである。

終りに、本論文をまとめるにあたり、いろいろご検討をしていただき、有益な助言を賜わった岡山大学工学部本田和男教授に厚くお礼申し上げます。

(昭和41年12月3日、日本材料学会東北支部秋季講演会にて講演)

参考文献

- (1) 成瀬政男・井上和夫，“歯車の塑性加工”第1編（1963）養賢堂
- (2) 井上和夫・他2名，機械学会講演論文集，No. 180（'67-10）69
- (3) (1)に同じ p. 35
- (4) 会田俊夫・寺内喜男，機械学会論文集，27-870（1961）

X-Ray Residual Stress and Hardness Measurement on Cold Rolled Gear

Kazuo INOUE and Seizo UEMATSU

Department of Precision Engineering, Faculty of Engineering

There has been few systematic investigation made on the fatigue strength of cold rolled gear under practical conditions so far as we know.

The aim of this investigation is to study basic properties on the rolled gear.

X-ray stress measurement and observation on the structure of work hardened surface layer were performed.

The obtained results are as follows :

- (1) Residual stress at the fillet of gear teeth is compressive stress, and its value is about -20kg/mm^2 .
- (2) In the case of non-pre-cut rolled gear, work hardened surface layer is about $0.4\sim 0.6\text{mm}$ in depth, and the maximum value of hardness on the layer is VHN 250 \sim 350.
- (3) The hardness and thickness of the layer has a tendency to vary along the gear tooth surface. The value at the pitch point is lower than one of the other position, and one at the fillet is the highest.
- (4) According to the observation of microstructure and X-ray diffraction pattern, the texture in the surface layer is the fiber structure and crystals at the core of gear teeth are elongated to the radial direction.